

การผลิตไบโอออยล์จากการไพโรไลซิสแบบเร็วของกาก/เปลือกเมล็ดมะเยาหิน และกากเมล็ดปาล์มโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟอง

Bio-oil Production by Fast Pyrolysis of Tung Oil Seed Cake/Shell and Palm Kernel Cake in a Bubbling Fluidised-bed Reactor

ณัฐพันธ์ พรหมสำเภา นุชิตา สุวแพทย์ อติศักดิ์ ปัตติยะ

หน่วยปฏิบัติการวิจัยพลังงานชีวภาพและทรัพยากรหมุนเวียน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม รหัสไปรษณีย์ 44150

E-mail: adisak_pattiya@yahoo.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการไพโรไลซิสกากและเปลือกเมล็ดมะเยาหินแบบเร็วในเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิด์เบดแบบฟองที่ทำงานต่อเนื่อง เพื่อมุ่งหาปริมาณผลได้และสมบัติของน้ำมันชีวภาพหรือไบโอออยล์และนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกับผลจากการไพโรไลซิสกากเมล็ดปาล์มแบบเร็ว ผลการทดลองพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จากกากและเปลือกเมล็ดมะเยาหินมีค่าร้อยละ 72.1 ± 2.7 และ 54.6 ± 2.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ขณะที่เมื่อใช้สภาวะการทดลองเดียวกัน กากเมล็ดปาล์มให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 60.7 ± 2.7 โดยน้ำหนัก ไบโอออยล์ที่ผลิตจากกากและเปลือกเมล็ดมะเยาหินมีสมบัติส่วนใหญ่ใกล้เคียงกับสมบัติของไบโอออยล์ทั่วไป และมีสมบัติเด่นที่น่าสนใจคือ มีค่าพีเอช 7.8 และ 6.6 ตามลำดับ นอกจากนี้กากเมล็ดมะเยาหินยังให้ไบโอออยล์ที่มีค่าความร้อนสูงมากเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ซึ่งสูงถึง 30 เมกะจูล/กิโลกรัม ซึ่งค่านี้มีค่ามากกว่าไบโอออยล์ที่ผลิตจากชีวมวลส่วนใหญ่

คำสำคัญ: มะเยาหิน ปาล์ม ไพโรไลซิสแบบเร็ว ไบโอออยล์

ABSTRACT

This research is a study of fast pyrolysis of tung oil seed cake and shell in a continuous bubbling fluidised bed reactor with an aim to investigate the bio-oil yields and properties as well as to compare the results with those of palm kernel seed cake fast pyrolysis. The results show that the yields of bio-oil derived from the cake and shell of tung oil seeds are $72.1 \pm 2.7\text{wt}\%$ and $54.6 \pm 2.7\text{wt}\%$, respectively. With the same experimental conditions, the palm kernel cake gave the bio-oil yield of $60.7 \pm 2.7\text{wt}\%$. According to the properties analyses, it was found that tung oil seed cake and shell bio-oils had most of the properties similar to typical bio-oil produced from biomass. However, the pH values of the tung oil seed cake and shell bio-oils were somewhat different, which were found to be 7.8 and 6.6, respectively. In addition, the tung oil seed cake also gave bio-oil with relatively high heating value of nearly 30 MJ/kg. This is higher than most bio-oil produced from biomass.

Keyword: Tung oil, Palm, Fast pyrolysis, Bio-oil

1. บทนำ

เนื่องจากปัญหาการขาดแคลนน้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัญหาหลักด้านพลังงาน ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อเศรษฐกิจในหลายประเทศรวมทั้งประเทศไทย การใช้พลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็นในการแก้ไขปัญหาดังกล่าว พลังงานทดแทนที่ได้จากการเกษตรที่เป็นที่นิยมอย่างแพร่หลายคือการผลิตไบโอดีเซลจากพืชน้ำมันเช่น ปาล์ม สบู่ดำ มะเขือเทศ เป็นต้น พืชน้ำมันเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตด้วยวิธีการหีบ น้ำมันนอกแล้วนำน้ำมันที่ได้ผ่านกระบวนการผลิตในขั้นตอนถัดไป กากของเสียในส่วนที่เหลือจากการหีบสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรกรรมหรืออาจนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ต่อไป แต่หากนำกากของเสียดังกล่าวมาผ่านกระบวนการทางความร้อนเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิงรูปแบบอื่นก็จะเป็นการใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งกากเมล็ดในที่ได้หลังจากการหีบยังคงมีน้ำมันส่วนหนึ่งหลงเหลืออยู่ ซึ่งสามารถนำมาผ่านกระบวนการเพื่อใช้ประโยชน์ได้

กระบวนการทางความร้อนที่สามารถแปรสภาพกากของเสียให้กลายเป็นเชื้อเพลิงที่ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแข็งเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า หากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของแก๊สเรียกว่ากระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน หรือหากผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของเหลวเรียกว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว โดยเชื้อเพลิงที่เป็นของเหลวนั้นมีข้อได้เปรียบคือสามารถจัดเก็บและขนส่งได้ง่ายกว่าเชื้อเพลิงที่เป็นแก๊ส เชื้อเพลิงเหลวมีพลังงานทางความร้อนที่สูงกว่าเชื้อเพลิงที่เป็นของแข็งทำให้มีค่าใช้จ่ายในการขนส่งที่ถูกกว่าเมื่อเทียบเป็นหน่วยพลังงาน

กระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วคือกระบวนการทางความร้อนอย่างหนึ่งที่สามารถแปรสภาพชีวมวลที่มีอยู่ตามธรรมชาติให้กลายเป็นเชื้อเพลิงเหลวที่เรียกว่าไบโอออยล์ได้ กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สลายชีวมวลด้วยความร้อนอย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการประกอบด้วยไบโอออยล์ ถ่านชาร์และแก๊ส ไบโอออยล์ที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

โดยทั่วไปมีสมบัติคล้ายน้ำมันเตา สามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อน้ำเพื่อใช้ในการปั่นกังหันผลิตไฟฟ้าได้ ไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกระบวนการมีปริมาณผลได้และสมบัติที่แตกต่างกันเมื่อสภาวะของกระบวนการผลิตแตกต่างกัน ชนิดของชีวมวลที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบเป็นหนึ่งในปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อปริมาณผลได้และสมบัติของไบโอออยล์ ปัจจุบันมีการศึกษาการนำชีวมวลมาใช้ผลิตไบโอออยล์หลากหลายชนิด รวมถึงการนำพืชน้ำมันมาใช้เป็นวัตถุดิบชีวมวล Kim และคณะ [1] ศึกษาการนำเปลือกและเมล็ดปาล์มเปล่ามาผลิตไบโอออยล์และพบว่าให้ปริมาณผลได้ถึงร้อยละ 51.9 และ 53.9 ตามลำดับ ไบโอออยล์ที่ผลิตได้มีปริมาณน้ำร้อยละ 1.2 โดยน้ำหนัก และมีค่าความร้อนสูง 30.9 เมกะจูล/กิโลกรัม Raja และคณะ [2] สามารถผลิตไบโอออยล์จากกากสบู่ดำได้สูงสุดถึงร้อยละ 64.2 โดยน้ำหนัก ไบโอออยล์จากกากสบู่ดำมีค่าความร้อนสูง 19.6 เมกะจูล/กิโลกรัม และความหนืด 7.4 เซนติสโตก จากงานวิจัยดังกล่าวพบว่าวัสดุเหลือใช้จากพืชน้ำมันชนิดปาล์มและสบู่ดำแสดงให้เห็นถึงความมีศักยภาพในการนำมาใช้ผลิตไบโอออยล์ค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับชีวมวลทั่ว ๆ ไป แต่มีชีวมวลอีกประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพเชิงพลังงานทดแทนค่อนข้างสูง [3] คือ เมล็ด มะเขือเทศ (Tung, Vernicia Montana) เนื่องจากมีศักยภาพในการให้ปริมาณน้ำมันใกล้เคียงกับพืชน้ำมันที่เพาะปลูกในประเทศไทย โดยผลผลิตน้ำมันสูงถึงร้อยละ 22.16 โดยน้ำหนัก [4] และสามารถนำมาผลิตเป็นไบโอดีเซลโดยมีกากของเหลือที่เป็นวัสดุเหลือใช้เช่นเดียวกับพืชน้ำมันชนิดอื่น กากของเมล็ดมะเขือเทศสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไบโอออยล์ได้ จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่ายังไม่มีการนำกากเมล็ดมะเขือเทศมาศึกษาในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วเพื่อผลิตไบโอออยล์ จึงไม่เป็นที่ทราบแน่ชัดว่าไบโอออยล์ที่ผลิตได้มีปริมาณผลได้เท่าใดและมีสมบัติเป็นอย่างไรเมื่อเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น จึงเป็นที่มาและวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่มุ่งศึกษาการไพโรไลซิสแบบเร็วของกากและเปลือกเมล็ดมะเขือเทศโดยเทียบกับกากเมล็ดปาล์มที่เคยมีการศึกษาแล้วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง นอกจากเพื่อศึกษาปริมาณผลได้

แล้วยังศึกษาสมบัติของไบโอออยล์ที่สำคัญประกอบด้วยค่าพีเอช ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง และความหนืด

2. วิธีดำเนินการ

2.1 วัตถุดิบชีวมวล

ชีวมวลที่ใช้ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็นสามชนิดคือกากเมล็ดมะเขือเทศ เปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์ม โดยเมล็ดมะเขือเทศที่ได้จากภาคเหนือถูกนำมาแกะทะาะเปลือกออกแล้วนำเมล็ดมะเขือเทศมาหีบนำน้ำมันออก ในส่วนของกากเมล็ดปาล์มที่ได้จากภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยนั้นมีการหีบนำน้ำมันออกแล้ว จากนั้นนำชีวมวลทั้งสามชนิดมาทำการสับให้ละเอียดแล้วคัดให้ได้ขนาด 0.212-0.500 มิลลิเมตร เพื่อใช้ในการทดลองและการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวล

การวิเคราะห์แบบประมาณของชีวมวลดำเนินการหาปริมาณน้ำด้วยวิธีการ NREL/TP-510-42621 [5] โดยการนำชีวมวลตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 105 ± 3 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ดำเนินการหาปริมาณสารระเหยด้วยมาตรฐาน ASTM-E872-82 [6] โดยการนำชีวมวลตัวอย่างที่ผ่านการอบแห้งจากการหาปริมาณน้ำแล้วมาเข้าเตาเผาที่อุณหภูมิ 950 ± 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที การหาปริมาณเถ้าดำเนินการตามวิธีการ NREL/TP-510-42622 [7] โดยการนำชีวมวลตัวอย่างมาเผาที่อุณหภูมิ 575 ± 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ± 6 ชั่วโมง ปริมาณคาร์บอนคงที่หาได้โดยใช้ผลต่างของปริมาณเถ้า ปริมาณสารระเหยและปริมาณน้ำ การหาค่าพลังงานความร้อนสูงโดยการตารางที่ 1 สมบัติของชีวมวล

ใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (Bomb Calorimeter) ความหนาแน่นรวมหาโดยวิธีการชั่งน้ำหนักชีวมวลเทียบกับปริมาตร ความหนาแน่นปรากฏหาโดยวิธีการชั่งน้ำหนักชีวมวลที่นำมาแทนที่น้ำเพื่อเทียบกับปริมาตรของน้ำ ผลการวิเคราะห์สมบัติของชีวมวลแสดงดังตารางที่ 1

2.2 อุปกรณ์ไฟโรไลซิสแบบเร็ว

อุปกรณ์ที่ใช้ผลิตไบโอออยล์ด้วยกระบวนการไฟโรไลซิสแบบเร็วคือชุดเครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟองขนาดห้องทดลองดังรูปที่ 1 ชุดอุปกรณ์นี้ประกอบด้วยเตาปฏิกรณ์ฟลูอิดไคซ์เบดแบบฟอง (Fluidised-bed reactor) ชุดอุ่นแก๊สร้อน (Pre-heater) ชุดป้อนชีวมวล (Biomass feeder) ไซโคลน (Cyclone) 2 ชุด ตัวกรองไอร้อน (Hot filter) ชุดควบแน่นด้วยน้ำ (Water-cooled condenser) ชุดตกตะกอนไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic precipitator: ESP) ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน (Dry ice/acetone condenser) 2 ชุด และชุดกรองสำลี (Cotton wool filter) โดยภายในเตาปฏิกรณ์บรรจุตัวกลางถ่ายโอนความร้อนที่เป็นทรายซิลิกาขนาด 0.250–0.425 มิลลิเมตร น้ำหนัก 300 กรัม ตัวกรองไอร้อนบรรจุใยแก้ว 10 กรัม ชุดป้อนชีวมวลใช้สกรูป้อน 2 ชั้น การให้ความร้อนแก่ระบบใช้หลอดความร้อนขนาด 1,000 วัตต์ที่ติดตั้งกับอิฐทนความร้อน ชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ใช้แรงดันไฟฟ้า 14 กิโลโวลต์ ชุดควบแน่นด้วยน้ำและทางเข้าเตาปฏิกรณ์ใช้น้ำอุณหภูมิประมาณ 30 องศาเซลเซียส กระบวนการไฟโรไลซิสในการทดลองนี้ใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นแก๊สพาในระบบเพื่อพาไอไฟโรไลซิสออกจากบริเวณโซนร้อนเข้าสู่ชุดควบแน่นและ

การวิเคราะห์	กากเมล็ดมะเขือเทศ	เปลือกเมล็ดมะเขือเทศ	กากเมล็ดปาล์ม
การวิเคราะห์แบบประมาณ (ร้อยละโดยน้ำหนัก, ฐานแห้ง)			
ความชื้น	3.6	9.2	7.4
สารระเหย	83.1	64.5	74.1
คาร์บอนคงที่	10.0	18.2	9.1
เถ้า	3.3	8.1	9.4
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูล/กิโลกรัม)	22.9	17.8	18.9
ความหนาแน่นรวม (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	365.1	239.9	417.9
ความหนาแน่นปรากฏ (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	1248.3	615.0	1215.0

พาชีวมวลเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ โดยทำให้ทรายเกิดการลอยตัวนอกจากนี้ยังใช้ไล่ออกซิเจนออกจากระบบเพื่อให้เป็นระบบไพโรไลซิส แก๊สไนโตรเจนดังกล่าวถูกควบคุมอัตราการไหล ณ ตำแหน่งบนของถังชีวมวล และสกรูป้อนชีวมวลด้วยอัตรา 1 และ 3 ลิตรต่อนาทีตามลำดับ

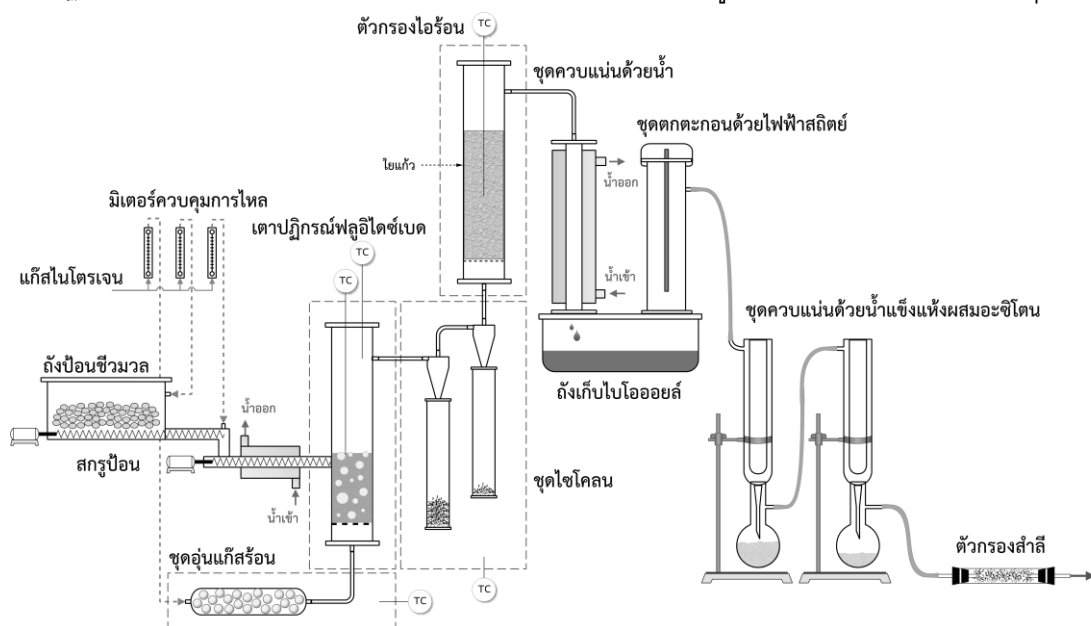
ในการดำเนินการทดลอง เริ่มแรกทำการเปิดชุดวาล์วน้ำหล่อเย็นทางเข้าของชีวมวลสู่เตาปฏิกรณ์ และชุดควบแน่นด้วยน้ำ จากนั้นเปิดชุดให้ความร้อนด้วยไฟฟ้าแก่เตาปฏิกรณ์ ชุดไซโคลน ตัวกรองไอรอน และข้อต่อหรือท่อสำเลียงต่าง ๆ ให้ความร้อนถึงอุณหภูมิที่ต้องการ จากนั้นทำการเปิดวาล์วแก๊สไนโตรเจนที่ตำแหน่งสกรูป้อนชีวมวล ถังชีวมวล และส่วนล่างของเตาปฏิกรณ์ พร้อมกับปรับชุดควบคุมการไหลของแก๊สไนโตรเจนทำให้เกิดการเคลื่อนตัวของแก๊สในระบบอย่างต่อเนื่องเพื่อปรับสถานะให้เป็นระบบไพโรไลซิสแล้วจึงเปิดชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ พร้อมกับบรรจุน้ำแข็งแห้งและอะซิโตนในชุดควบแน่น

ขั้นตอนถัดไปเป็นการป้อนชีวมวล โดยชีวมวลที่บรรจุในถังชีวมวลถูกป้อนเข้าสู่เตาปฏิกรณ์ด้วยสกรูป้อนอย่างรวดเร็วทำให้ชีวมวลถูกย่อยสลายภายใต้แก๊สไนโตรเจน กระบวนการไพโรไลซิสที่เกิดขึ้นในเตาปฏิกรณ์ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ประกอบด้วยไอไฟ

โรไลซิส แก๊ส และส่วนที่เหลือคือถ่านชาร์ ซึ่งผลิตภัณฑ์ดังกล่าวมีการเคลื่อนที่ไปยังอุปกรณ์ถัดไปด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ไหลในระบบ ถ่านชาร์ที่ได้ส่วนใหญ่ถูกกักเก็บในถังเก็บที่อยู่ใต้ชุดไซโคลน ผลิตภัณฑ์ส่วนที่เหลือไหลผ่านชุดกรองไอรอนซึ่งภายในบรรจุใยแก้วสำหรับดักจับถ่านชาร์ที่มีขนาดอนุภาคเล็ก หลังจากนั้นไอไพโรไลซิสถูกควบแน่นด้วยชุดควบแน่นด้วยน้ำ และชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ทำให้ไอไพโรไลซิสเกิดการควบแน่นเป็นละอองของเหลวและรวมตัวกันเป็นไบโอออยล์ ไอไพโรไลซิสและผลิตภัณฑ์แก๊สในส่วนที่เหลือถูกส่งไปยังชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตนจำนวน 2 ชุด ทำให้เกิดการควบแน่นกลายเป็นไบโอออยล์อีกชั้นหนึ่ง หลังจากนั้นจึงปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยผ่านชุดกรองสำลี

2.3 การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

การทดลองผลิตไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วของการทดลองนี้มีตัวแปรต้นประกอบด้วยชนิดของชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ กากเมล็ดมะเขือเทศ เปลือกเมล็ดมะเขือเทศ และกากเมล็ดปาล์ม ตัวแปรตามของการทดลองนี้ประกอบด้วยปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์และสมบัติของไบโอออยล์ ได้แก่ ค่าพีเอช ปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ความหนาแน่น ค่าความร้อนสูง และความหนืด ตัวแปรควบคุมของการ



รูปที่ 1 แผนภาพอุปกรณ์ในกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็ว

ทดลองประกอบด้วยขนาดของชีวมวล 0.212-0.500 มิลลิเมตร อัตราการป้อนชีวมวล 100 กรัม/ชั่วโมง อัตราการไหลของไนโตรเจนตำแหน่งฟลูอิดซ์ 7 ลิตร/นาที่ และอุณหภูมิเตาปฏิกรณ์ 500 องศาเซลเซียส ขณะที่อุณหภูมิของชุดไซโคลน ตัวกรองไอรอน และข้อต่อหรือท่อลาล้างอยู่ที่ 420 องศาเซลเซียส เวลาในการทดลองแต่ละครั้งประมาณ 1 ชั่วโมง ทำการทดลองซ้ำในส่วนของการกากเมล็ดมะเยาหินและกากเมล็ดปาล์ม ชนิดละ 1 การทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความสามารถในการทำซ้ำ

2.4 สมดุลมวล

การทำสมดุลมวลใช้การคำนวณความแตกต่างของน้ำหนักอุปกรณ์ก่อนและหลังการทดลอง โดยน้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของถังป้อนชีวมวลก่อนและหลังการทดลองคือปริมาณของชีวมวลที่ใช้ไป น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของเตาปฏิกรณ์ ไซโคลน 2 ชุด ตัวกรองไอรอน และข้อต่อหรือท่อลาล้างต่าง ๆ ที่อยู่ในบริเวณร้อน ก่อนและหลังการทดลองคือปริมาณของถ่านชาร์ที่ผลิตได้ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงไปของชุดควบแน่นด้วยน้ำ ชุดตกตะกอนด้วยไฟฟ้าสถิตย์ ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน 2 ชุด และชุดกรองลาล้าง ก่อนและหลังการทดลองคือปริมาณของไบโอออยล์ที่ผลิตได้ ซึ่งปริมาณของผลิตภัณฑ์ดังกล่าวสามารถคำนวณหาปริมาณของแก๊สที่ผลิตได้โดยใช้ผลต่างของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด

2.5 การวิเคราะห์ไบโอออยล์

2.5.1 ปริมาณน้ำ ปริมาณน้ำในไบโอออยล์วัดโดยใช้วิธีการไทเทรตของคาล ฟิชเชอร์ (Karl Fisher titration) โดยใช้เครื่องมือมาตรฐานยี่ห้อ Mettler Toledo รุ่น V20 สารที่ใช้เป็นตัวทำปฏิกิริยา Hydranal composite 5 และ Hydranal Medium K ยี่ห้อ Fluka Analytical

2.5.2 ปริมาณของแข็ง การหาปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ใช้วิธีการวัดโดยเครื่องสูญญากาศ (Vacuum) ตามมาตรฐาน ASTM D7579 โดยการใช้เอทานอล 100 กรัม เป็นตัวทำละลายไบโอออยล์ตัวอย่างประมาณ 1 ถึง 2 กรัม แล้วนำของเหลวไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 (Filter Papers

Qualitative Circles 70 mm Cat No 1005 070 by WhatmanTM) ที่มีขนาดรูพรุน 2.5 ไมโครเมตร

2.5.3 ค่าพีเอช วัดค่าพีเอชของไบโอออยล์โดยใช้เครื่องมือวัดค่าพีเอช ยี่ห้อ Denver รุ่น UB-10 ก่อนการวัดค่าพีเอชของไบโอออยล์จะดำเนินการวัดค่าพีเอชกับสารมาตรฐานทุกครั้ง สารมาตรฐานที่ใช้มีค่าพีเอช 4 7 และ 10

2.5.4 ความหนาแน่น ความหนาแน่นของไบโอออยล์หาได้จากน้ำหนักของไบโอออยล์ที่ซึ่งได้ต่อหน่วยปริมาตร (g/ml) ความหนาแน่นของไบโอออยล์หาโดยการเติมไบโอออยล์ลงในขวดวัดความหนาแน่นขนาด 20 มิลลิเมตร แล้วนำมาชั่งเพื่อหาน้ำหนักที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงเทียบหน่วยเป็นกิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

2.5.5 ค่าความร้อนสูง ค่าความร้อนสูงหาโดยใช้เครื่องวิเคราะห์ค่าความร้อนสูง (Bomb Calorimeter) ยี่ห้อ ESSOM รุ่น Art 2060/2070 ดำเนินการโดยใช้เบนโซอิกเป็นสารทดสอบมาตรฐาน จากนั้นใช้ไบโอออยล์ประมาณ 1 กรัม ในการทดสอบ

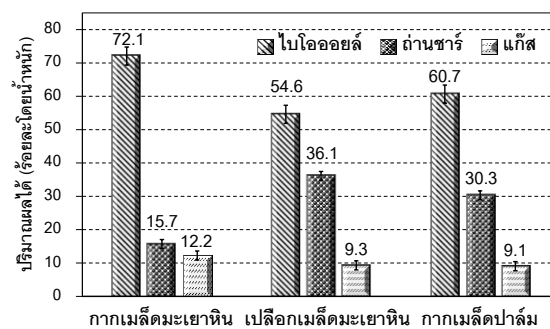
2.5.6 ค่าความหนืด การวัดค่าความหนืดดำเนินการโดยใช้หลอดแก้ววัดความหนืดยี่ห้อ Cannon-Fenske Routine 9721-B77 Size 350 ทำการวัดค่าความหนืดที่อุณหภูมิ 40°C ด้วยวิธีการจับเวลาในการไหลของไบโอออยล์ภายในหลอดแก้ว แล้วนำหน่วยที่ได้เป็นวินาทีมาคูณกับค่าคงที่ของหลอด ($Factor_{350} = 2.433 \text{ cSt/s}$) จะได้ค่าความหนืดของไบโอออยล์หน่วยเป็นเซนติสโตก (cSt)

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

การทดลองกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแบบเร็วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดซ์เบดแบบฟองได้ผลิตภัณฑ์ 3 ส่วน ได้แก่ ไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส เมื่อทำการทดลองซ้ำในส่วนของการกากเมล็ดมะเยาหินและกากเมล็ดปาล์มชนิดละ 1 ซ้ำ พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานร้อยละ 2.7 1.3 และ 1.4 โดยน้ำหนักตามลำดับ การกระจายสัมพัทธ์ (Relative spread) ของไบโอออยล์ ถ่านชาร์ และแก๊ส มีร้อยละ 3.8 8.6

และ 11.0 ตามลำดับ ซึ่งค่าการกระจายสัมพัทธ์ของไบโอออยล์และถ่านชาร์ที่ได้มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 7 แสดงว่าการทำซ้ำของการทดลองเป็นที่ยอมรับ [8] ขณะที่ค่าการกระจายสัมพัทธ์ของแก๊สยังคงต่ำพอที่จะสามารถเป็นที่ยอมรับได้เช่นกัน [9]

ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ จากการทดลองชีวมวลทั้ง 3 ชนิด แสดงดังรูปที่ 2 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ผลิตจากกากเมล็ดมะเขือเทศมีปริมาณสูงที่สุดที่ร้อยละ 72.1±2.7 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบกับพืชน้ำมันอย่างกากเมล็ดปาล์มที่ผลิตได้เพียงร้อยละ 60.7±2.7 โดยน้ำหนัก Kim และคณะ [1] ผลิตไบโอออยล์จากกากเมล็ดปาล์มที่ใช้เครื่องปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไรซ์เบดแบบพองพบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 53 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบปริมาณผลได้จากกากเมล็ดปาล์มที่ผลิตได้พบว่าปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงกว่าเล็กน้อย แต่หากเทียบกับปริมาณผลได้จากกากเมล็ดมะเขือเทศพบว่ากากเมล็ดมะเขือเทศมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงกว่ากากเมล็ดปาล์ม เมื่อเทียบปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จากกากเมล็ดมะเขือเทศกับพืชน้ำมันชนิดอื่นเช่น กากสบู่ดำที่มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 64.2 [2] โดยน้ำหนัก พบว่ากากเมล็ดมะเขือเทศมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์สูงกว่ากากสบู่ดำ นอกจากนั้น Kim และคณะ [1] ยังทำการศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากเปลือกเมล็ดปาล์มโดยสามารถผลิตไบโอออยล์มีปริมาณผลได้ร้อยละ 51.9 โดยน้ำหนัก ซึ่งหากเทียบกับปริมาณผลได้ของเปลือกเมล็ดมะเขือเทศที่ผลิตได้ร้อยละ 54.6±2.7 พบว่ามีปริมาณผลได้ที่ใกล้เคียงกัน แต่ยังคงมีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์น้อยกว่ากากเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์มเนื่องจากในส่วนของเปลือกเมล็ดอาจมีน้ำมันผสมอยู่เพียงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับกากเมล็ดมะเขือเทศ ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ที่ผลิตจากกากเมล็ดมะเขือเทศ กากเมล็ดปาล์ม และเปลือกเมล็ดมะเขือเทศมีความแตกต่างกันซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารระเหยในชีวมวล หากมีปริมาณสารระเหยในชีวมวลสูงทำให้ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์มีสูงเช่นกัน



รูปที่ 2 ปริมาณผลได้ของผลิตภัณฑ์

สำหรับการนำชีวมวลที่ไม่ใช่พืชน้ำมันที่ถูกนำมาผลิตไบโอออยล์โดยใช้เตาปฏิกรณ์ชนิดฟลูอิดไรซ์เบดอย่าง Suttibak และคณะ [10] ศึกษาการผลิตไบโอออยล์จากเหง้ามันสำปะหลังสามารถผลิตไบโอออยล์มีปริมาณผลได้ร้อยละ 63.2 โดยน้ำหนัก Heo และคณะ [11] ผลิตไบโอออยล์จากซีลีอมีปริมาณผลได้ร้อยละ 58.1 โดยน้ำหนัก Zhang และคณะ [12] ผลิตไบโอออยล์จากซังข้าวโพดมีปริมาณผลได้ร้อยละ 56.8 โดยน้ำหนัก เมื่อเทียบปริมาณผลได้ของไบโอออยล์พบว่ากากเมล็ดมะเขือเทศมีปริมาณผลได้สูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นที่ไม่ใช่พืชน้ำมัน

ไบโอออยล์จากกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วที่ผลิตได้แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 3 ซึ่งได้แก่ ไบโอออยล์เฟสหนืด (Viscous phase) เฟสน้ำ (Aqueous phase) และเฟสน้ำมัน (Oily phase) ไบโอออยล์เฟสหนืดได้จากถังเก็บไบโอออยล์มีลักษณะสีน้ำตาลเข้มเกือบดำและหนืดข้น ไบโอออยล์เฟสน้ำและน้ำมันได้

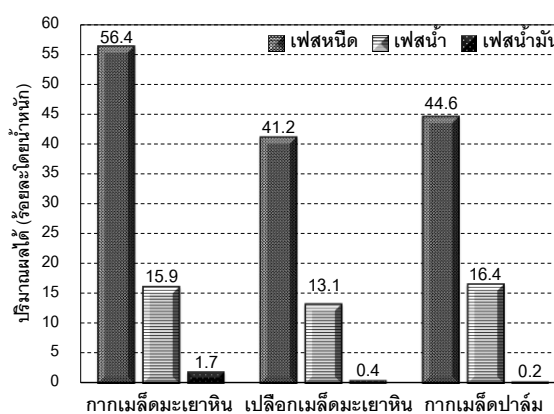


รูปที่ 3 ลักษณะของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ

จากชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน ลักษณะของไบโอออยล์เฟสน้ำมีลักษณะเหลวใส มีตะกอนเล็กน้อยและมีน้ำผสมอยู่เป็นจำนวนมาก ไบโอออยล์เฟสน้ำมันมีลักษณะสีเหลืองใสไม่รวมตัวกับเฟสน้ำแต่ลอยตัวอยู่ด้านบนของเฟสน้ำคล้ายน้ำมันเชื้อเพลิงทั่วไป

ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์แต่ละเฟสแสดงดังรูปที่ 4 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักจากกากเมล็ดมะเยาหินมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือกากเมล็ดปาล์ม และเปลือกเมล็ดมะเยาหินมีปริมาณผลได้น้อยที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณผลได้รวมของไบโอออยล์ในรูปที่ 2 ซึ่งมีการเรียงลำดับปริมาณผลได้ของไบโอออยล์จากน้อยไปหามากเหมือนกัน ขณะเดียวกันปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสน้ำก็มีการเรียงลำดับปริมาณเช่นเดียวกับไบโอออยล์เฟสหนัก แสดงถึงปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสหนักและเฟสน้ำมีความสัมพันธ์กับปริมาณผลได้รวมของไบโอออยล์ ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสน้ำมันแต่ละชนิดไม่สอดคล้องกันกับเฟสอื่น ๆ โดยปริมาณผลได้ของไบโอออยล์เฟสน้ำมันจากกากเมล็ดมะเยาหินมีปริมาณมากที่สุด รองลงมาคือเปลือกเมล็ดมะเยาหิน และกากเมล็ดปาล์มที่มีปริมาณผลได้น้อยที่สุด เนื่องจากกากเมล็ดมะเยาหินอาจมีปริมาณน้ำมันหลงเหลืออยู่มากกว่ากากเมล็ดปาล์มทำให้ละอองของน้ำมันที่ย่อยสลายไม่หมดเกิดการควบแน่นที่ชุดควบแน่นด้วยน้ำแข็งแห้งผสมอะซิโตน ไบโอออยล์เฟสน้ำมันที่ผลิตได้สามารถติดไฟได้ง่ายแต่ไม่สามารถนำไปวิเคราะห์ได้เนื่องจากมีปริมาณเพียงเล็กน้อย

การวิเคราะห์สมบัติของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกระบวนการ ดำเนินการวิเคราะห์เฉพาะไบโอออยล์



รูปที่ 4 ปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ทั้ง 3 เฟส

เฟสหนักเพราะเป็นส่วนที่มีปริมาณมากที่สุดและเป็นส่วนที่สามารถนำไปใช้งานได้ สมบัติของไบโอออยล์เฟสหนักที่ผลิตได้จากชีวมวลแสดงในตารางที่ 2 ไบโอออยล์ที่ผลิตจากกากและเปลือกเมล็ดมะเยาหินมีค่าพีเอชใกล้เคียงความเป็นกลาง แตกต่างจากไบโอออยล์ทั่วไปที่มีค่าพีเอช 2 ถึง 4 [13] ซึ่งมีความเป็นกรดสูง ไบโอออยล์ที่มีค่าพีเอชใกล้เคียงความเป็นกลางเกิดจากปริมาณของสารที่เป็นกรด (Total acid number) ในไบโอออยล์มีจำนวนน้อย ซึ่งเกิดขึ้นจากโครงสร้างของกากเมล็ดมะเยาหินที่สลายตัวกลายเป็นสารที่มีความเป็นกรดในปริมาณที่น้อยทำให้มีค่าพีเอชใกล้เคียงกับความเป็นกลาง เมื่อพิจารณาค่าพีเอชของไบโอออยล์ร่วมกับปริมาณน้ำพบว่าไบโอออยล์ที่มีปริมาณน้ำมากมีค่าพีเอชสูงซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาขจัดน้ำ (Dehydration) ของกากเมล็ดมะเยาหินมีมากทำให้ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ซึ่งมีความเป็นกลางมีสูง ขณะที่กากเมล็ดปาล์มเกิดปฏิกิริยาขจัดน้ำที่น้อย ส่งผลให้สารที่มีความเป็นกรดยังคงอยู่เป็นจำนวนมาก ค่าพีเอชของไบโอออยล์จากกากเมล็ดปาล์มจึงมีค่าน้อย

สมบัติของไบโอออยล์	ชนิดของชีวมวล		
	กากเมล็ดมะเยาหิน	เปลือกเมล็ดมะเยาหิน	กากเมล็ดปาล์ม
ค่าพีเอช	7.8	6.8	4.8
ปริมาณน้ำ (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	10.7	11.5	7.4
ปริมาณของแข็ง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)	1.1	1.1	0.9
ความหนาแน่น (กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร)	956.7	970.5	978.0
ค่าความร้อนสูง (เมกะจูล/กิโลกรัม)	29.9	22.6	27.1
ค่าความหนืด (เซนติสโตก)	121.7	316.5	163.0

ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ที่ผลิตได้มีน้อยกว่าไบโอออยล์โดยทั่วไปที่มีปริมาณไม่เกินร้อยละ 30 [14] โดยน้ำหนัก ปริมาณน้ำในไบโอออยล์ของกากและเปลือกเมล็ดมะเขือเทศมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าประมาณร้อยละ 11 โดยน้ำหนัก แต่น้อยกว่าไบโอออยล์จากกากเมล็ดปาล์มที่มีค่าร้อยละ 7.4 โดยน้ำหนัก น้ำที่เกิดขึ้นในไบโอออยล์มาจากชีวมวลเริ่มต้นที่มีน้ำผสมอยู่ส่วนหนึ่ง อีกส่วนหนึ่งเกิดจากปฏิกิริยาขจัดน้ำที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิต น้ำที่เกิดขึ้นจากกระบวนการส่วนใหญ่ถูกควบแน่นด้วยอุณหภูมิที่รวมตัวกันเป็นไบโอออยล์เฟสน้ำ มีเพียงส่วนน้อยเท่านั้นที่ควบแน่นพร้อมกันกับไบโอออยล์เฟสหนืด เป็นผลให้ไบโอออยล์เฟสหนืดมีปริมาณน้ำที่น้อย ดังนั้นความชื้นของชีวมวลที่สูงจึงมีโอกาสนำให้น้ำเกิดการควบแน่นพร้อมกันกับไบโอออยล์เฟสหนืดเพิ่มมากขึ้น แต่ปริมาณน้ำของไบโอออยล์จากกากเมล็ดมะเขือเทศมีค่าสูงเกิดจากปฏิกิริยาขจัดน้ำในกระบวนการเกิดขึ้นมากซึ่งมีโอกาสนำไปควบแน่นพร้อมกับไบโอออยล์เฟสหนืดเพิ่มมากขึ้น หากไบโอออยล์มีปริมาณน้ำที่ต่ำจะมีค่าความร้อนที่สูงซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้งานแต่ทำให้ความหนืดของไบโอออยล์เพิ่มขึ้นซึ่งอาจส่งผลเสียต่อการนำไปใช้งานโดยเฉพาะอย่างยิ่งการปั๊มและการฉีด [15]

ปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ที่ผลิตได้มีประมาณร้อยละ 0.9 ถึง 1.1 โดยน้ำหนัก ซึ่งสูงกว่าไบโอออยล์ทั่วไปที่มีร้อยละ 0.2 ถึง 1 โดยน้ำหนัก [15] อาจเกิดจากสภาวะของการทดลองเช่นอัตราการไหลของไนโตรเจนที่สูงเกินไปหรือขนาดอนุภาคของชีวมวลที่เล็กเกินกว่าชุดไซโคลนจะดักจับได้ แต่หากต้องการลดปริมาณของแข็งในไบโอออยล์สามารถทำได้โดยทำการทดลองหาอัตราการไหลของไนโตรเจนหรือขนาดอนุภาคของชีวมวลที่เหมาะสมต่อการผลิต และอาจทำการปรับปรุงชุดกรองไอร้อนใหม่โดยใช้งานร่วมกับเครื่องกรองแบบเกรนูลาร์ที่สามารถกรองถ่านชาร์ขนาดเล็กไม่ให้หลุดไปยังชุดควบแน่นเพื่อลดปริมาณของแข็งในไบโอออยล์ลงได้ [16]

ความหนาแน่นของไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากชีวมวลทั้ง 3 ชนิดมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก แต่มีค่าน้อยกว่าความหนาแน่นของไบโอออยล์มาตรฐาน ASTM

D7544 ที่มีค่า 1100 ถึง 1300 กิโลกรัม/ลูกบาศก์เมตร [14]

ค่าความร้อนสูงของไบโอออยล์จากกากเมล็ดมะเขือเทศมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับเปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์ม ซึ่งค่าความร้อนสูงใกล้เคียงกับไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากกากสบู่ดำที่มีค่า 29.7 เมกะจูล/กิโลกรัม [1] แต่ยังคงมีค่าความร้อนสูงที่สูงกว่าไบโอออยล์ที่ผลิตจากชีวมวลที่ไม่ใช่พืชน้ำมันอย่างเหง้ามันสำปะหลังที่มีค่า 22.1 เมกะจูล/กิโลกรัม [10] และชังข้าวโพดที่มีค่า 18.8 เมกะจูล/กิโลกรัม [12] โดยทั่วไปไบโอออยล์มีค่าความร้อนสูง 16 ถึง 19 เมกะจูล/กิโลกรัม [15] ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้ในเครื่องยนต์ดีเซลเท่านั้น

ความหนืดของไบโอออยล์จากกากเมล็ดมะเขือเทศมีค่าต่ำที่สุดเมื่อเทียบกับเปลือกเมล็ดมะเขือเทศและกากเมล็ดปาล์ม ไบโอออยล์ที่ผลิตได้จากชีวมวลทั้ง 3 ชนิด มีความหนืดสูงกว่าไบโอออยล์จากกากสบู่ดำที่มีความหนืด 7.4 เซนติสโตก [2] และยังมีค่าความหนืดสูงกว่าไบโอออยล์จากเหง้ามันสำปะหลังที่มีความหนืดเพียง 5.1 เซนติสโตก [17] ความหนืดของไบโอออยล์เป็นสมบัติหนึ่งในการพิจารณาการนำไปใช้งาน หากมีความหนืดของเชื้อเพลิงที่ไม่เหมาะสมอาจมีปัญหาในระบบหัวฉีดในห้องเผาไหม้

4. สรุปผลการทดลอง

การผลิตไบโอออยล์ด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบเร็วโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ฟลูอิดไชน์เบดแบบพองจากกากเมล็ดมะเขือเทศ เปลือกเมล็ดมะเขือเทศ และกากเมล็ดปาล์ม มีปริมาณผลได้ของไบโอออยล์ร้อยละ 72.1 ± 2.7 54.6 ± 2.7 และ 60.7 ± 2.7 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ ไบโอออยล์ที่ผลิตจากกากเมล็ดมะเขือเทศมีปริมาณผลได้สูงกว่าชีวมวลชนิดอื่นรวมถึงชีวมวลที่ไม่ใช่พืชน้ำมัน ไบโอออยล์มีสมบัติส่วนใหญ่ใกล้เคียงไบโอออยล์ทั่วไปเช่นปริมาณน้ำ ปริมาณของแข็ง ความหนาแน่น และความหนืด สมบัติเด่นของไบโอออยล์จากกากเมล็ดมะเขือเทศคือค่าความร้อนสูงที่มีมากกว่าไบโอออยล์ทั่วไปและค่าพีเอชที่ใกล้เคียงความเป็นกลาง

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงาน
คณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. W. Kim, B. S. Koo, J. W. Ryu, J. S. Lee, C. J. Kim, D. H. Lee, G. R. Kim and S. Choi, "Bio-oil from the pyrolysis of palm and Jatropha wastes in a fluidized bed," *Fuel Processing Technology*, vol. 108, pp. 118-124, 2013.
- [2] S. A. Raja, Z. R. Kennedy, B. C. Pillai and C. L. R. Lee, "Flash pyrolysis of jatropha oil cake in electrically heated fluidized bed reactor," *Energy*, vol. 35, pp. 2819-2823, 2010.
- [3] R. Chanta, "The product processing of the alternative energy plant "Candlenuts" based on the cultural community economic system in Maenapak Community Mae Ho Pra Sub-district," *Journal of Agr. Research & Extension*, vol. 29, pp. 34-40, 2011.
- [4] K. Sasujit, N. Homduang and N. Dussadee, "Transesterification Process of Tung-oil Biodiesel Production by Ultrasonic with Microwave Irradiation and Its Effects in a Small diesel Engine," *The 25th Conference of the Mechanical Engineering Network of Thailand*, vol. 25, pp. 2011.
- [5] A. Sluiter, B. Hames, D. Hyman, C. Payne, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter, D. Templeton and J. Wolfe, "Determination of Total Solids in Biomass and Total Dissolved Solids in Liquid Process Samples," *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [6] ASTM-E872- 82, "Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels," *American Society for Testing and Materials*, 1998.
- [7] A. Sluiter, B. Hames, R. Ruiz, C. Scarlata, J. Sluiter and D. Templeton, "Determination of Ash in Biomass," *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [8] G. Yildiz, M. Pronk, M. Djokic, K. M. v. Geem, F. Ronsse, R. v. Duren and W. Prins, "Validation of a new set-up for continuous catalytic fast pyrolysis of biomass coupled with vapour phase upgrading," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 103, pp. 343-351, 2013.
- [9] R. J. M. Westerhof, N. J. M. Kuipers, S. R. A. Kersten and W. P. M. van Swaaij, "Controlling the Water Content of Biomass Fast Pyrolysis Oil," *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 46, pp. 9238-9247, 2007.
- [10] S. Suttibak, K. Sriprateep and A. Pattiya, "Production of Bio-oil via Fast Pyrolysis of Cassava Rhizome in a Fluidised-Bed Reactor," *Energy Procedia*, vol. 14, pp. 668-673, 2012.
- [11] H. S. Heo, H. J. Park, Y.-K. Park, C. Ryu, D. J. Suh, Y.-W. Suh, J.-H. Yim and S.-S. Kim, "Bio-oil production from fast pyrolysis of waste furniture sawdust in a fluidized bed," *Bioresource Technology*, vol. 101, pp. S91-S96, 2010.
- [12] H. Zhang, R. Xiao, H. Huang and G. Xiao, "Comparison of non-catalytic and catalytic fast pyrolysis of corncob in a fluidized bed reactor," *Bioresource Technology*, vol. 100, pp. 1428-34, 2009.
- [13] L. Qiang, L. Wen-Zhi and Z. Xi-Feng, "Overview of fuel properties of biomass fast pyrolysis oils," *Energy Conversion and Management*, vol. 50, pp. 1376-1383, 2009.

- [14] A. Oasmaa and C. Peacocke, "Properties and fuel use of biomass-derived fast pyrolysis liquids," *Journal*, vol. 731, pp. 2010.
- [15] S. Czernik and A. V. Bridgwater, "Overview of Applications of Biomass Fast Pyrolysis Oil," *Energy & Fuels*, vol. 18, pp. 590-598, 2004.
- [16] C. Paenpong, S. Inthidech and A. Pattiya, "Effect of filter media size, mass flow rate and filtration stage number in a moving-bed granular filter on the yield and properties of bio-oil from fast pyrolysis of biomass," *Bioresource Technology*, vol. 139, pp. 34-42, 2013.
- [17] A. Pattiya and S. Suttibak, "Production of bio-oil via fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantations in a fluidised-bed reactor with a hot vapour filtration unit," *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, vol. 95, pp. 227-235, 2012.